

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Кафедра хімії та фізики

05-06-52

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з фізичного лабораторного
дослідницького практикуму

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за
освітньо-професійною програмою «Геодезія та землеустрій»
спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з якості ННІАЗ
Протокол № 5 від 10.03.2020р.

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізичного лабораторного дослідницького практикуму для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Геодезія та землеустрій» спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Орленко В. Ф., Гаєвський В. Р., Рудик Б. П. – Рівне : НУВГП, 2020. – 27 с.

Укладачі:

Орленко В. Ф., кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри хімії та фізики;

Гаєвський В. Р., кандидат технічних наук, доцент кафедри хімії та фізики;

Рудик Б. П., завідувач навчальних лабораторій кафедри хімії та фізики.

Відповідальний за випуск:

Гарашенко В. І., кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри хімії та фізики.

Керівник групи забезпечення спеціальності

Мошинський В. С., доктор сільськогосподарських наук, професор.

© Орленко В. Ф., Гаєвський В. Р.,
Рудик Б. П., 2020
©НУВГП, 2020

Зміст

Зміст.....	3
Передмова	4
Лабораторна робота № 1.3 Визначення моменту інерції маятника Максвелла.....	5
Лабораторна робота № 1.5 Визначення моменту інерції маятника Обербека.....	11
Лабораторна робота № 2.1 Визначення в'язкості рідини методом Стокса.....	18
Література	25
Додаток 1	26
Додаток 2	27

Передмова

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізичного лабораторного дослідницького практикуму призначені для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Геодезія та землеустрій» спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій» денної та заочної форм навчання.

Метою лабораторного практикуму є поглиблення розуміння фізичних процесів та набуття експериментальних навичок під час виконання лабораторних робіт.

Завданням лабораторного практикуму є формування поглибленого розуміння фізичних процесів при виконанні лабораторних робіт з розділів фізики "Механіка", "Молекулярна фізика та термодинаміка".

У лабораторному практикумі розглядається поняття механіка обертового руху: момент інерції твердого тіла, момент імпульсу та момент сили. Перевірено фундаментальні закони збереження моменту імпульсу та механічної енергії, дисипативність реальних систем та залежність величини в'язкого тертя від різних фізичних величин.

Безпосередня інтерактивна взаємодія студентів з приладами та спеціальними лабораторними установками сприяє виробленню у студентів навичок експериментатора, важливості врахування всіх діючих чинників під час розробки експерименту, аналізу отриманих експериментальних результатів тощо.

Виконання студентами запропонованих дослідницьких робіт може бути як виокремлено у окремий практикум (спецкурс), або ж бути частиною лабораторного фізичного практикуму. Кожний студент виконує лабораторну роботу, результатом виконання якої є оформлення звіту за зразком, поданим у додатках 1 та 2 методичних вказівок. Після здачі звіту студент відповідає на контрольні запитання, що містяться у кінці кожної лабораторної роботи.

Лабораторна робота № 1.3

Визначення моменту інерції маятника Максвелла

Мета роботи: визначити момент інерції маятника Максвелла.

Дослідити: вплив сил тертя (опору) на вимірювання моменту інерції маятника Максвелла.

Теоретичні відомості

(Теорія до даної роботи описана в лекційному курсі інтерактивного комплексу, §§1.9, 1.11-1.14, 1.17.)

Повна **механічна енергія** дорівнює сумі кінетичної і потенціальної

$$E = (E_k + E_n).$$

Закон збереження повної механічної енергії: повна механічна енергія консервативної системи зберігається.

$$E_k + E_n = \text{const}.$$

Консервативна система це система, в якій виконують роботу лише потенціальні сили, як внутрішні, так і зовнішні. Крім того, зовнішні сили повинні бути стаціонарні (незалежні від часу).

Дисипативна (неконсервативна) система це система, в якій виконують роботу непотенціальні сили, наприклад, сили тертя.

Потенціальні сили – це такі, робота яких не залежить від форми шляху. Наприклад, сила гравітації або сила пружності.

Непотенціальні сили – це такі, робота яких залежить від форми шляху. Наприклад, сила тертя або опору.

Момент інерції твердого тіла, що обертається навколо осі Z, рівний сумі моментів інерції всіх матеріальних точок, з яких складається дана система

$$I_z = \sum m_i r_{iz}^2 \quad (I_z = \int r_z^2 dm),$$

де r_{iz} – віддаль i -ої матеріальної точки від осі обертання Z.

Кінетична енергія тіла при поступальному русі

$$E = \frac{mv^2}{2}.$$

Кінетична енергія тіла при обертальному русі

$$E = \frac{I\omega^2}{2}.$$

Опис установки та вивід робочої формули

Загальний вигляд маятника Максвелла показаний на рис. 1. На основі **1** закріплена вертикальна стійка **2** до якої прикріплений верхній кронштейн **3** і рухомий нижній кронштейн **4**. На верхньому кронштейні знаходиться електромагніт **5** і фотоелектричний датчик **Д₁**. На нижньому кронштейні

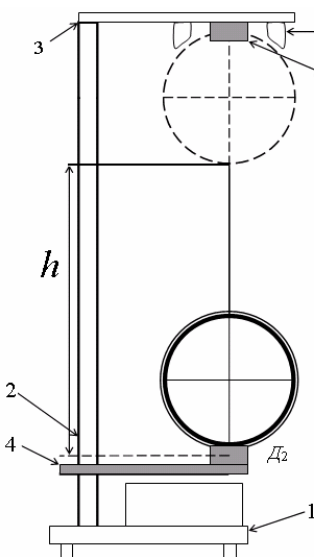


Рис. 1.

прикріплений фотоелектричний датчик **Д₂**.

Власне маятник – це підвішений біфілярним способом диск, на який одягаються змінні кільця. Таким чином, змінюється момент інерції системи.

Маятник у верхньому положенні утримується електромагнітом. Довжина маятника визначається за допомогою міліметрової шкали, закріпленої на стійці приладу.

Фотоелектричні датчики з'єднані з мілісекундоміром.

Нехай h – віддаль, яку проходить маятник між фотоелектричними датчиками **Д₁** і **Д₂**.

Потенціальна енергія маятника у верхньому положенні

$$U = mgh, \quad (1)$$

де m – маса маятника, g – прискорення вільного падіння.

В процесі руху маятника його потенціальна енергія перетворюється у кінетичну. Нехтуючи втратами енергії на

роботу проти сил тертя, для кінцевого нижнього положення маятника можна записати закон збереження енергії:

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}, \quad (2)$$

де v – швидкість поступального руху маятника в кінцевому положенні, ω – його кутова швидкість в цьому положенні, I – момент інерції маятника.

Для рівноприскореного руху маятника $v = at$, $h = \frac{at^2}{2}$, де a – прискорення, t – час руху. З останніх співвідношень отримуємо

$$v = \frac{2h}{t}. \quad (3)$$

Швидкість поступального руху маятника дорівнює лінійній швидкості точок поверхні осі. Тоді

$$\omega = \frac{v}{r}, \quad (4)$$

де r – радіус осі.

З формул (3) і (4) отримаємо:

$$\omega = \frac{2h}{rt}. \quad (5)$$

Підставляючи (3); (4), (5) в (2), знайдемо момент інерції маятника Максвелла:

$$I = mr^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (6)$$

Якщо виразити радіус осі через її діаметр d , то отримаємо вираз для I :

$$I = \frac{md^2}{4} \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (7)$$

Хід роботи

1. В різних місцях намотування нитки визначити діаметр осі d (дослід повторити 5 разів).
2. Визначити відстань h між фотоелектричними датчиками за допомогою міліметрової шкали на вертикальній стійці приладу.
3. Намотати нитку підвісу таким чином, щоб диск маятника дотикався до полюса електромагніта, відтиснути кнопку "Пуск".
4. Натиснути послідовно кнопки "Сброс" , "Пуск" і визначити час t руху маятника, та висоту підйому маятника h_1 .
5. Дослід за пунктами 3,4 повторити 5 разів.
6. Оцінити паспортні приладові похибки та похибки табличних величин.
7. Обчислити середні значення d та t .
8. За робочою формулою (7) обчислити I момент інерції маятника.
9. Обчислити відносну і абсолютну похибки, записати кінцевий результат

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{2 \Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{(t^2 \Delta g)^2 + (2 t g \Delta t)^2 + \left(\frac{g t^2 \Delta h}{h}\right)^2}{(g t^2 - 2 h)^2}\right)}$$

$$\Delta I = \varepsilon \cdot I .$$

Результати вимірювань

$$\begin{array}{ll}
 m = & \Delta m_0 = \\
 g = & \Delta g_0 = \\
 h = & \Delta d_0 = \\
 & \Delta h_0 = \\
 & \Delta t_0 =
 \end{array}$$

№з.п.	$d,$	$\Delta d,$	$h_1,$	$t,$	$\Delta t,$
СІ					
1					
2					
3					
4					
5					
Ср.					

Дослідження впливу тертя на вимірювання моменту інерції маятника Максвелла

Врахуємо у робочій формулі (7) втрати енергії маятника на роботу сил тертя. Згідно закону збереження механічної енергії

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} + A_{mp}.$$

Припускаємо, що робота A_{mp} пропорційна висоті h , тоді формула роботи має вигляд:

$$A_{mp} = \frac{mg(h - h_1)}{h + h_1} \cdot h,$$

де h - висота падіння, h_1 - висота підйому маятника.

Нова робоча формула визначення моменту інерції із врахуванням роботи сил тертя матиме вигляд:

$$I_1 = \frac{m d^2}{4} \left(\frac{g t^2}{2 h} - \frac{mg(h - h_1)}{h + h_1} \cdot h - 1 \right). \quad (8)$$

Підрахувати момент інерції твердого тіла за формулою (8) та порівняти його з результатом підрахунку за формулою (7). Оцінити методичну похибку вимірювань моменту інерції без врахування сил тертя, дисипативність $\left(\eta = \frac{A_{mp}}{mgh} \right)$ та консервативність $(1 - \eta)$ системи.

Контрольні питання

1. Дати визначення кінетичної, потенціальної та повної механічної енергії?
2. Які системи називають консервативними, дисипативними?
3. Які сили називають потенціальними, непотенціальними? Навести приклади.
4. Сформулювати закон збереження механічної енергії.
5. Дати означення моменту інерції твердого тіла.
6. Записати вирази кінетичної енергії для поступального та обертального рухів.
7. Вивести вираз для кінетичної енергії обертального руху.
8. Вивести робочі формули (7) та (8).

Лабораторна робота № 1.5

Визначення моменту інерції маятника Обербека

Мета роботи: визначити момент інерції маятника Обербека.

Дослідити: вплив сил тертя (опору) на визначення моменту інерції маятника Обербека.

Теоретичні відомості

(Теорія до даної роботи описана в лекційному курсі інтерактивного комплексу, §§1.9, 1.10)

При поступальному русі мірою інертності *матеріальної точки* (тіла) є маса. При обертальному русі матеріальної точки - **момент інерції**, рівний добутку маси матеріальної точки на квадрат відстані до центра або осі обертання.

$$I_i = m_i r_i^2.$$

У випадку системи матеріальних точок (*твердого тіла*), що обертається навколо деякої осі Z , **момент інерції** рівний сумі моментів інерції всіх матеріальних точок, з яких складається дана система

$$I_z = \sum m_i r_{iz}^2,$$

де r_{iz} – віддаль i -ої матеріальної точки від осі обертання Z .

Коли ж маса рівномірно розподілена по всьому об'єму тіла, то від суми можна перейти до інтегралу

$$I_z = \int r_z^2 dm.$$

Теорема Штейнера: момент інерції тіла I відносно довільної осі Z рівний моменту його інерції I_0 відносно паралельної осі, що проходить через центр мас тіла C , плюс добуток маси тіла m на квадрат віддалі d між осями

$$I = I_0 + md^2.$$

Момент сили \vec{M} відносно центра обертання O рівний векторному добутку радіуса-вектора \vec{r} , проведеного від центра обертання до точки прикладання сили, на силу \vec{F}

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F},$$

його модуль рівний

$$M = F \cdot r \cdot \sin \alpha.$$

Добуток $r \cdot \sin \alpha = d$ – це найкоротша віддаль від напрямку дії сили \vec{F} до центра обертання O , яку називають плечем сили d .

Момент імпульсу твердого тіла відносно точки

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times m_i \vec{v}_i.$$

Основний закон динаміки обертального руху тіла відносно деякої нерухомої осі Z записують як:

$$\frac{dL_z}{dt} = M_z,$$

де L_z – момент імпульсу твердого тіла відносно осі Z , M_z – головний момент зовнішніх сил твердого тіла відносно осі Z

Момент імпульсу відносно деякої осі Z можна записати як:

$$L_z = I_z \omega.$$

Закон збереження моменту імпульсу твердого тіла відносно осі: якщо головний момент зовнішніх сил M_z відносно осі рівний нулю, то момент імпульсу твердого тіла відносно тієї ж осі зберігається, $L_z = \text{const}$, тобто $L_z \cdot \omega = \text{const}$.

Опис установки та вивід робочої формули

Загальний вигляд маятника Обербека зображений на рис.1. На вертикальній стійці **1**, закріплені два кронштейни: верхній рухомий **2** і нижній нерухомий **3**. Власне, маятник складається з

двохступінчатого шківa 4, закріпленого на осі обертання; чотирьох взаємно перпендикулярних стержнів 5 і однакових тягарців 6, які можна переміщувати вздовж стержнів. Тягарці 6 розміщуються симетрично, щоб центр мас системи співпадав з віссю обертання. Маятник приводиться в обертальний рух за допомогою тягарця 7, прикріпленого до нитки, намотаної на шків. Паралельно до нитки, на стійці розміщена масштабна лінійка. З її допомогою вимірюється висота падіння тягарця.

На нижній втулці (за шківом) розміщений електромагніт, який після підключення до нього напруги живлення, утримує за допомогою муфти маятник в стані спокою.

На верхньому і нижньому кронштейнах (2, 3) знаходяться фотоелектричні датчики. Вони виробляють електричні імпульси початку і кінця вимірювання часу мілісекундоміром.

Момент інерції маятника може бути визначений з основного рівняння динаміки обертального руху

$$I = \frac{M}{\varepsilon}, \quad (1)$$

тобто вимірювання моменту інерції зводиться до визначення моменту сили M і кутового прискорення ε . Визначимо силу, що діє на шків, яка рівна силі натягу нитки (силою тертя нехтуємо)

$$F = mg - ma, \quad (2)$$

де m – маса тягарця (9), a – прискорення, з яким рухається тягарець.

Тоді обертальний момент M дорівнює

$$M = m(g - a)R, \quad (3)$$

де R – радіус шківa.

Тягарець (9) опускається рівноприскорено, тому

$$h = \frac{at^2}{2}, \quad (4)$$

де h – висота падіння тягарця, t – час падіння. Звідси лінійне прискорення

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (5)$$

Кутове прискорення маятника обчислюється за формулою

$$\varepsilon = \frac{a}{R} = \frac{2h}{Rt^2}. \quad (6)$$

Підставляючи (3), (5), (6) в (1) і врахувавши, що $R = \frac{d}{2}$ (d – діаметр шківів), отримаємо формулу для знаходження моменту інерції маятника Обербека.

$$I = \frac{m d^2}{4} \left(\frac{g t^2}{2 h} - 1 \right). \quad (7)$$

Хід роботи

1. Розмістити тягарці на кінцях стержнів маятника таким чином, щоб центр мас системи співпадав з віссю обертання.
2. Виміряти діаметр шківів d .
3. Визначити віддаль між фотоелектричними датчиками h .
4. Визначити масу тягарця m .
5. Ввімкнути прилад в мережу живлення.
6. Натиснути послідовно кнопки «Сброс», «Пуск».
7. Намотати на шків 4 нитку таким чином, щоб тягарець 7 знаходився на рівні фотоелектричного датчика 2 (над світловим променем), який розміщений на верхньому кронштейні і відтиснути кнопку «Пуск».
8. Натиснути кнопку «Пуск», привівши маятник в рух і зняти відлік часу падіння тягарця t .
9. Натиснути кнопки «Сброс» і дослід за пунктами 6-7 повторити 5 разів.
10. Вимкнути живлення приладу та провести вимірювання висоти підйому тягарця h_1 . Дослід повторити 5 разів.
11. Оцінити паспортні приладові похибки та похибки табличних величин.
12. Обчислити середні значення t і d .

13. За робочою формулою (9) обчислити момент інерції маятника Обербека.
14. Обчислити відносну і абсолютну похибки, записати кінцевий результат

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{2 \Delta d}{d}\right)^2 + \frac{\left(t^2 \Delta g\right)^2 + (2 t g \Delta t)^2 + \left(\frac{g t^2 \Delta h}{h}\right)^2}{\left(g t^2 - 2 h\right)^2}}$$

$$\Delta I = \varepsilon \cdot I .$$

Результати вимірювань

$m =$

$\Delta m_0 =$

$g =$

$\Delta g_0 =$

$h =$

$\Delta d_0 =$

$\Delta h_0 =$

$\Delta t_0 =$

№з.п.	$d,$	$\Delta d,$	$h_1,$	$t,$	$\Delta t,$
СІ					
1					
2					
3					
4					
5					
Ср.					

Дослідження впливу тертя на вимірювання моменту інерції маятника Обербека

Врахуємо у робочій формулі (7) втрати енергії маятника на роботу сил тертя. Згідно закону збереження механічної енергії

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} + A_{mp}.$$

Припускаємо, що робота A_{mp} пропорційна висоті h , тоді формула роботи має вигляд:

$$A_{mp} = \frac{mg(h - h_1)}{h + h_1} \cdot h,$$

де h - висота падіння, h_1 - висота підйому маятника.

Нова робоча формула визначення моменту інерції із врахуванням роботи сил тертя матиме вигляд:

$$I_1 = \frac{m d^2}{4} \left(\frac{g t^2}{2 h} - \frac{mg(h - h_1)}{h + h_1} \cdot h - 1 \right). \quad (8)$$

Підрахувати момент інерції твердого тіла за формулою (8) та порівняти його з результатом підрахунку за формулою (7). Оцінити методичну похибку вимірювань моменту інерції без врахування сил тертя, дисипативність $\left(\eta = \frac{A_{mp}}{mgh} \right)$ та консервативність $(1 - \eta)$ системи.

Контрольні запитання

1. Вивести основний закон динаміки обертального руху твердого тіла відносно осі.
2. Що таке момент інерції твердого тіла?
3. Сформулювати теорему Штейнера.
4. Дати визначення моменту сили відносно осі? Що називають

плечем сили?

5. Дати визначення моменту імпульсу тіла відносно осі. Записати основне рівняння динаміки обертального руху через момент імпульсу.
6. Сформулювати закон збереження моменту імпульсу твердого тіла відносно осі, його практичне використання.
7. Виразити момент імпульсу твердого тіла відносно осі через його момент інерції.
8. Обчислити момент інерції маятника Обербека аналітичним способом та порівняти його з результатами експерименту.

Лабораторна робота № 2.1

Визначення в'язкості рідини методом Стокса

Мета роботи: визначити в'язкість рідини.

Дослідити: умови застосування методу Стокса (рівномірності руху кулі в досліджуваній рідині).

Теоретичні відомості і опис установки

(Теорія до даної роботи описана в лекційному курсі інтерактивного комплексу §2.19, 2.20)

Молекули газів та рідин внаслідок теплового руху безперервно і хаотично рухаються. При цьому вони обмінюються імпульсами та енергіями. Якщо в середовищі існує просторова неоднорідність густини, температури або швидкості впорядкованого руху окремих шарів, то на тепловий рух молекул накладається впорядкований рух, який веде до вирівнювання цих неоднорідностей.

Явища переносу – це процеси встановлення рівноваги в системі шляхом переносу маси (дифузія), енергії (теплопередача) та імпульсу напрямленого руху (внутрішнє тертя або в'язкість).

Явище дифузії полягає у взаємному проникненні і перемішуванні частинок речовини внаслідок неоднорідності густини чи різниці концентрацій компонент суміші в різних точках об'єму. Потік маси виникає в напрямку зменшення густини чи концентрації. Це явище описується емпіричним **законом Фіка**.

$$dM = -D \frac{d\rho}{dz} S dt ,$$

де D – дифузія, яка дорівнює масі речовини, що переноситься через одиницю площі за одиницю часу при одиничному

градієнті густини; $\frac{d\rho}{dz}$ – градієнт густини; S – площа поверхні; dt – час переносу.

Якщо вдовж осі Z існує градієнт температури $\frac{dT}{dz}$, то в напрямку зменшення температури виникає потік тепла через поверхню площею S перпендикулярну до осі Z . Явище *теплопередачі* описує **закон Фур'є**.

$$dQ = -K \frac{dT}{dz} S dt,$$

де dQ – кількість теплоти; dt – проміжок часу; K – теплопровідність речовини – це кількість теплоти, що проходить за одиницю часу через одиничну площу при одиничному градієнті густини. Механізм явища теплопровідності полягає в передачі енергії теплового хаотичного руху при зіткненні молекул.

У явищі *внутрішнього тертя* (в'язкості) спостерігається перенос імпульсу

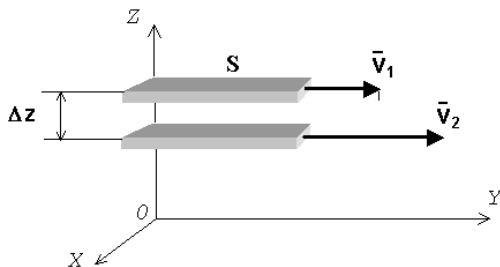


Рис. 1

імпульсу напрямленого руху від молекул із шарів, які рухаються швидше до повільніших і навпаки. У результаті більш швидкий шар гальмується, менш швидкий прискорюється (рис. 1). Такий процес з

механічної точки зору можна пояснити виникненням сил тертя, які сповільнюють більш швидкий і прискорюють повільніший шари молекул. Ці сили напрямлені по дотичній до поверхні стичних шарів проти відносної швидкості. Дослід показує, що імпульс руху dp , що передається із шару в шар через поверхню пропорційний градієнту швидкості $\frac{dv}{dz}$ шарів, площі цієї поверхні S та часу переносу dt

$$dp = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S dt .$$

В результаті між шарами виникає сила внутрішнього тертя

$$F = \left| \frac{dp}{dt} \right| = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S, \quad (1)$$

де η – в'язкість, яка залежить від природи речовини і її стану. Із співвідношення (1) визначимо:

$$\eta = \frac{F}{\left| \frac{dv}{dz} \right| S}. \quad (2)$$

В'язкість η – чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, яка діє між шарами одиничної площі при одиничному градієнті швидкості.

Нехай тіло рухається в рідині, що його змочує. До поверхні тіла прилипає шар рідини (внаслідок міжмолекулярних сил притягання),

який буде рухатись швидше ніж суміжний шар. Між цими шарами виникає градієнт швидкості $\frac{dv}{dz}$ і це веде до виникнення

сили в'язкості (внутрішнього тертя), яка є силою опору. Згідно (1), сила внутрішнього тертя між сусідніми шарами пропорційна градієнту швидкості та площі стичних шарів S .

Шари, що віддалені від поверхні тіла, майже не рухаються. Отже градієнт швидкості пропорційний швидкості руху тіла. Таким чином, сила в'язкості:

$$F = k \cdot u, \quad (3)$$

де u – швидкість тіла, k – коефіцієнт пропорційності, який залежить від природи рідини і від форми та розмірів тіла. Стокс показав, що для кульки, яка рухається рівномірно з невеликою швидкістю (в цьому випадку опір рідини зумовлено лише силою тертя)

$$F = 6 \pi r \eta u, \quad (4)$$

де r – радіус кульки.

Нехай кулька падає в рідині (рис. 2). На неї діють сили:

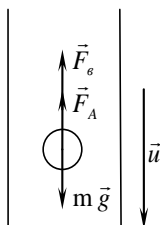


Рис. 2

\vec{F}_A – Архімеда, $m\vec{g}$ – сила тяжіння, \vec{F}_g – сила в'язкості. Модуль рівнодійної цих сил

$$R = mg - F_A - F_g. \quad (5)$$

Швидкість кульки зростає до тих пір, поки рівнодійна не стане рівною нулю, тоді

$$F_g = mg - F_A; \quad (6)$$

$$mg = \rho_1 V g; \quad (7)$$

$$F_A = \rho_2 V g; \quad (8)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3. \quad (9)$$

Після підстановки в (7) співвідношень (4), (7), (8), (9) отримаємо

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 g (\rho_1 - \rho_2)}{v}, \quad (10)$$

де ρ_1 – густина кульки, ρ_2 – густина рідини, V – об'єм кульки,

g – прискорення вільного падіння.

Установка для вимірювання в'язкості – це циліндр з рідиною (рис. 3), на якому у верхній і нижній частинах зроблені мітки. Верхня мітка знаходиться на такій висоті, щоб при її досягненні рух кульки міг би вважатись рівномірним. Якщо відстань між мітками l , а час падіння t , то швидкість

$$v = \frac{l}{t}. \quad (11)$$

Виразимо радіус кульки через її діаметр

$$r = d/2. \quad (12)$$

Підставивши (11), (12) в (10) отримаємо робочу формулу:

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{g (\rho_1 - \rho_2) t d^2}{l}. \quad (13)$$

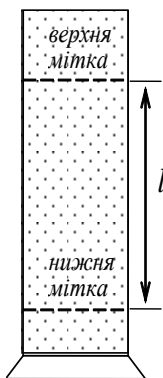


Рис. 3

Дослідження умов рівномірності руху кульки в рідині

Для визначення оптимальних умов вимірювання в'язкості рідини методом Стокса слід оцінити швидкість руху кульки в рідині. Для цього з певної виміряної висоти h над рівнем поверхні рідини кидаємо кульку і фіксуємо час t проходження віддалі l . Використовуючи сітку для вилову кульки повторюємо дослід з тією ж кулькою 10 разів, змінюючи висоту h від 0 до 10 см. Дані занести в таблицю 1 і побудувати графік залежності швидкості v від висоти h .

Графічно визначаємо середнє значення швидкості v_0 (початок горизонтальної частини графіка), а також відповідне значення h_0 . Оптимальну висоту кидання h_0 можна порівняти з аналітичним виразом:

$$h_0 = \frac{v_0^2}{2g}. \quad (14)$$

Таблиця 1

$h, \text{м}$										
$v, \text{м/с}$										

Хід роботи

1. Виміряти віддаль l між верхньою і нижньою мітками на циліндрі за допомогою міліметрової шкали.
2. Виміряти діаметр кульки d за допомогою мікрометра (дослід повторити 5 разів). Дані занести до таблиці 2.
3. Знайти оптимальну висоту кидання кульки h_0 .
4. Кидаючи кульку з висоти h_0 над поверхнею рідини, виміряти секундоміром час проходження кульки віддалі l . Використовуючи сітку дослід повторити з тією ж кулькою 5 разів.
5. Записати значення ρ_1, ρ_2, g .

6. Оцінити паспортні приладові похибки та похибки табличних величин.
7. Обчислити за робочою формулою (13) в'язкість рідини η .
8. Обчислити відносну і абсолютну похибки, записати кінцевий результат.

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \frac{(\Delta \rho_1)^2 + (\Delta \rho_2)^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2}$$

$$\Delta \eta = \varepsilon \cdot \eta$$

Результати вимірювань

$\rho_1 =$	$\Delta(\rho_1)_0 =$
$\rho_2 =$	$\Delta(\rho_2)_0 =$
$g =$	$\Delta g_0 =$
$l =$	$\Delta l_0 =$
$\nu_0 =$	$\Delta d_0 =$
$h_0 =$	$\Delta t_0 =$

№	$d,$	$\Delta d,$	$t,$	$\Delta t,$
CI				
1				
2				
3				
4				
5				
Cp				

Контрольні запитання

1. Дати характеристику явищам переносу, характерні особливості та закони, що їх описують. (Що, куди і чому переноситься в кожному із цих явищ).

2. В чому полягає суть явища в'язкого тертя? Записати вираз для сили внутрішнього тертя.
3. Який фізичний зміст в'язкості?
4. Пояснити механізм виникнення сили в'язкого тертя, що діє на кульку, яка рухається у в'язкому середовищі.
5. В чому суть методу Стокса, записати формулу Стокса.
6. Вивести робочу формулу (13).
7. Як змінюється швидкість кульки при падінні в рідині? Чим це зумовлено?

Література

1. М. О. Ковалець, В. Ф. Орленко, М. В. Бялик та ін. Загальна фізика. Частина I: інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2009. 396 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/2084> (дата звернення: 02.02. 2020).

2. Д. І. Олексин, В. Ф. Орленко, Д. І. Вадець та ін. Загальна фізика. Частина II : інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2009. 457 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/2085> (дата звернення: 02.02. 2020.)

Приклад оформлення титульної сторінки

НУВГП

Кафедра хімії та фізики

Звіт

про виконання практичної роботи №_____

на тему: " Визначення моменту інерції маятника Максвелла ".

Виконав:

ст. ГЗ-11

Прізвище, ініціали

Перевірив:

Прізвище, ініціали

Рівне 2020 р

Приклад оформлення звіту

1. Мета роботи: визначити момент інерції маятника Максвелла.

Дослідити: вплив сил тертя (опору) на вимірювання моменту інерції маятника Максвелла.

2. Робоча формула:

$$I = \frac{m d^2}{4} \left(\frac{g t^2}{2h} - 1 \right) \quad I_1 = \frac{m d^2}{4} \left(\frac{g t^2}{2h} - \frac{mg(h - h_1)}{h + h_1} \cdot h - 1 \right)$$

m - маса маятника,

d - діаметр осі маятника, на яку намотується нитка,

h - висота падіння маятника (віддаль, яку проходить маятник між фотоелектричними датчиками),

t - час руху маятника між фотоелектричними датчиками,

g - прискорення вільного падіння.

3. Результати вимірювань:

$m =$ $\Delta m_0 =$ $g =$ $\Delta g_0 =$

$h =$ $\Delta d_0 =$ $\Delta h_0 =$ $\Delta t_0 =$

№з.п.	$d,$	$\Delta d,$	$h,$	$t,$	$\Delta t,$
Сі					
1					
2					
3					
4					
5					
Ср.					

4. Обробка результатів вимірювань

5. Кінцевий результат